

## بررسی نقش اندازه ذرات مولد رادیو اکتیو در پراکنش ذرات آلفا و بتا در محفظه ایمنی راکتور تحقیقاتی شهر تهران

غلامرضا مرادی<sup>۱</sup>، رسول یاراحمدی<sup>۲</sup>، یوسف پورعشق<sup>۳</sup>، علی اصغر فرشاد<sup>۴</sup>، اصغر صدیق زاده<sup>۵\*</sup>، سعید پرستار<sup>۳</sup>،  
روح اله حاجی زاده<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران <sup>۲</sup> استادیار گروه بهداشت حرفه‌ای، عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران. <sup>۳</sup> کارشناسی ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران <sup>۴</sup> دانشیار گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران. <sup>۵</sup> دانشیار گروه پژوهشی فیزیک، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران <sup>۶</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران  
نویسنده مسئول: تلفن: ۰۲۱-۸۲۰۶۴۳۲۶ فکس: ۰۲۱-۸۲۰۶۳۰۹۵ ایمیل: asadigzadeh@yahoo.com

### چکیده

**زمینه و هدف:** در صنعت هسته‌ای، آئروسول‌ها نقش بسزایی در انتشار و پخش آلودگی دارند. راکتورهای هسته‌ای منبع اصلی آلودگی در چرخه سوخت می‌باشند و رادیو ایزوتوپ‌های مختلفی را به محیط انتشار می‌دهند. در این مطالعه توزیع اندازه و اکتیویته آئروسول‌ها در سه ایستگاه کاری در داخل محفظه ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از کاسکد ایمپکتور اندرسن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**روش بررسی:** غلظت جرمی و توزیع جرم اندازه ذرات هوابرد در محیط محفظه با استفاده از نمونه‌بردار محیطی کاسکید ایمپکتور مدل اندرسن تعیین شد. به منظور شناسایی رادیو نوکلیدهای موجود در ذرات معلق محفظه از فیلتر الیافی استفاده شده است. جهت تعیین عناصر شیمیایی و غلظت در نمونه‌ها از دستگاه ICP-MS و از دستگاه‌های اسپکتروسکوپی گاما و سنتیلاسیون مایع بمنظور شناسایی رادیونوکلیدها و میزان پرتوزایی آنها در ذرات معلق هوای داخل محفظه استفاده شد.

**یافته‌ها:** رادیونوکلیدهای  $k^{40}$ ،  $Ac^{228}$ ،  $Tl^{208}$ ،  $Be^{214}$ ،  $Be^{212}$ ،  $Pb^{214}$ ،  $Pb^{212}$  در نمونه‌های آئروسولی توسط گاما اسپکتروسکوپی شناسایی شد. توزیع جرم اندازه با ماکزیمم پیک برای ذرات ریز در گستره بین ۰ تا ۰/۴ میکرون بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین کسر اکتیویته آلفا و بتا بر روی ذرات آئروسولی با گستره سایزی کمتر از ۰/۴ میکرون جذب می‌شوند.

**نتیجه گیری:** می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین اکتیویته مربوط به ذرات در ناحیه انبارشی و هسته‌بندی (ذرات ریز) است. منشأ این ذرات را می‌توان لخته شدن ذرات مد «هسته بندی» و همچنین هسته‌هایی ناشی از رشد تراکم در محدوده مورد مطالعه بیان نمود.

**واژه‌های کلیدی:** ذرات آئروسول، توزیع جرم اندازه، اکتیویته، سنتیلاسیون مایع، راکتور تهران، ایمپکتور اندرسن

## مقدمه

آلودگی هوا نگرانی عمده بسیاری از بخش‌های تولیدی در صنایع است. در صنعت هسته‌ای، آئروسول‌ها مهم‌ترین راه انتشار و پخش آلودگی می‌باشند. فعالیت‌های انسانی همچون تأسیسات هسته‌ای و چرخه سوخت هسته‌ای شامل معدن کاری، فرزکاری، غنی سازی سوخت، ساخت و بهره برداری از راکتور، فعالیت راکتور، ذخیره سازی سوخت و ضایعات منجر به تولید و رهاسازی مقدار مشخصی اکتیویته به محیط می‌شوند. راکتورهای هسته‌ای منبع اصلی آلودگی در چرخه سوخت می‌باشند و رادیو ایزوتوپ‌های مختلفی را به محیط انتشار می‌دهند [۱]. این رادیو ایزوتوپ‌ها پس از برخورد با ذرات موجود در محیط بر روی آن‌ها نشسته و تثبیت می‌شوند و ذرات آئروسولی به وجود می‌آورند که محور آلودگی را تشکیل می‌دهند [۲،۳]. این ذرات از راه تنفس وارد بدن شده و ضایعاتی در آن ایجاد می‌کنند [۴]. در این میان مستنداتی مبنی بر ارتباط بین ذرات آئروسول رادیو اکتیو با سرطان برونشial بدست آمده است [۵]. به منظور تخمین اثر آئروسول‌های رادیواکتیو بر روی سلامتی افراد و محیط زیست، دانستن اطلاعاتی درباره غلظت، ترکیب و توزیع اندازه آئروسول‌های محیطی ضروری است. به طوری که این اطلاعات بدون اندازه‌گیری و توصیف مشخصه‌های شیمیائی، فیزیکی و هسته‌ای ذرات آئروسول محیطی عملاً غیر ممکن است [۶]. توزیع جرم-اندازه<sup>۱</sup> در شناخت ماهیت آئروسول‌های محیطی، توزیع اندازه ذرات و آگاهی از پتانسیل اثر ذرات بر روی افراد و محیط زیست یک تکنیک فنی مهندسی و بهداشتی است [۷،۸]. توزیع اندازه ذرات بر مکانیسم‌های حذف، نقل و انتقال، نیمه عمر، دینامیک ذرات و اثرات تشعشعی، زمان ماند یک ذره در اتمسفر، اثرات فیزیولوژیکی و مطالعه میزان انتشار

ذرات از پروسه‌های صنعتی تأثیرگذار می‌باشد. اندازه‌گیری دقیق غلظت جرمی ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )، غلظت عددی ( $\text{P}/\text{m}^3$ ) و تعیین توزیع اندازه ذرات پرتوزا بسیار مشکل است و مطالعات تخصصی در راستای اندازه‌گیری سطح و جرم ذرات، همچنین غلظت جرمی و عددی ذرات به طور کامل انجام نگرفته است. مطالعات یاراحمدی و همکاران نشان داده است که بیش از ۸۰٪ اکتیویته آلفا و بتا مربوط به ذراتی با قطر کمتر از  $1/1 \mu\text{m}$  و تنها کمتر از ۲۰٪ اکتیویته مربوط به ذرات درشت با قطر متوسط بیش از  $1 \mu\text{m}$  می‌باشند. طبق نتایج بدست آمده از این تحقیق ناحیه انبارشی آئروسول‌های محیطی با سهم اکتیویته ۸۰٪، دارای متوسط قطر اکتیویته آئرو دینامیکی (AMAD) حدود  $3 \mu\text{m}$  می‌باشند [۹]. همچنین نتایج پورستن‌دورفر<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۴ نشان داده است که بیش از ۹۵-۹۳٪ از  $\text{Pb}^{210}$  بر روی ذرات آئروسولی با گستره سایزی مدل انبارشی جذب و تنها ۷-۴٪ از فعالیتشان برای روی ذرات هسته‌بندی با کمتر از ۶۰ nm جذب می‌شوند. بر اساس نتایج تحقیقات رینکینگ<sup>۳</sup> و همکاران علاوه بر ناحیه مدل انبارشی دو مدل دیگر از توزیع سایز اکتیویته با درصد سهم کمتری وجود دارد. بر این اساس ۱۰-۴۰٪ اکتیویته به ذرات با دامنه سایزی ۱۰-۱۰۰ نانومتر (مدل هسته‌بندی) و ۱۰-۰٪ بر روی ذراتی با قطر بیش از ۱۰۰۰ نانومتر مشاهده می‌شود [۱۰]. توزیع اکتیویته و مشخصات شیمیایی ذرات در محیط‌های شغلی و غیر شغلی برحسب سایز ذرات آئروسول توسط دستگاه کاسکد ایمپکتور اینرسیال اندازه‌گیری می‌شود. لذا با توجه به اثر اندازه ذرات رادیواکتیو در نشست آنها در نقاط مختلف دستگاه تنفسی تأثیر آن بر سلامت کارکنان و ساکنین اطراف تأسیسات هسته‌ای و همچنین تأثیر آن در انتخاب سیستم‌های کنترلی شناخت طبیعت شیمیائی ذرات و

<sup>۲</sup> Porstendorfer<sup>۳</sup> Reineking<sup>۱</sup> Mass-Size Distribution

بخصوص توزیع اندازه آنها لذا هدف اصلی این مطالعه توزیع اندازه و اکتیویته ذرات آلفا و بتا در محیط راکتور جهت استراتژی کنترل مواجهه و انتشار آن به محیط می باشد.

### روش کار

روش های مختلفی برای اندازه گیری ذرات هوابرد رادیواکتیو بر اساس خواص فیزیکی (اپتیک، لختی، جرم و غیره) پایه گذاری شده اند. ذرات ریز معلق در هوا را می توان به روش های ته نشینی، صافی، رسوب دهنده های الکترواستاتیک، برخورد<sup>۱</sup> و رسوب دهنده گرمایی نمونه برداری کرد.

استفاده از غشای الیافی متداول ترین روش نمونه برداری از ذرات رادیواکتیو اتمسفری است. از میان انواع فیلترهای نمونه برداری، فیلترهای سلولزی مرسوم ترین نوع صافی جهت نمونه برداری از ذرات اتمسفری می باشند. این بسترها به علت اینکه ذرات را در داخل شبکه الیاف به دام می اندازند، برای شناسایی رادیونوکلیدهای ساطع کننده پرتو آلفا مناسب نمی باشند. بسترهای شیشه ای دارای کارایی بالا، جهت جمع آوری ذرات در هوا می باشند. این نوع بستر در مقابل جریان هوا مقاومت کمتری نشان می دهد که از مزیت های بسترهای الیاف شیشه ای است. وجود مقدار کمی پتاسیم ( $^4K$ ) در بسترهای الیاف شیشه ای ممکن است در شمارش ذرات رادیواکتیو ایجاد خطا کند. مشکلات تعمیر و نگه داری و ملاحظات ایمنی به دلیل ولتاژ بالا، کاربرد رسوب دهنده الکترواستاتیک را برای نمونه برداری ذرات رادیواکتیو را محدود کرده است. رسوب دهنده های حرارتی به علت اینکه هوا را با آهنگ بسیار کندی نمونه برداری می کنند کاربرد کمی در نمونه برداری از ذرات رادیواکتیو دارند. در این تحقیق جهت نمونه برداری از ذرات رادیواکتیو از روش استاندارد ISO 2889 استفاده

شد [۱۱] که در آن از دستگاه کاسکید ایمپکتور برای تعیین توزیع اندازه ذرات استفاده می شود. از آنالیز ذرات رسوب کرده در صفحات دایره ای شکل طبقات کاسکید ایمپکتور برای ارزیابی ترکیب شیمیایی و پرتوئی ذرات بر حسب اندازه آن ها استفاده شد [۱۲].

توزیع اندازه ذرات آئروسولی با استفاده از کاسکید ایمپکتور اندرسون<sup>۲</sup> مدل 1-ACFM انجام شد. از کاسکید ایمپکتور به خاطر داشتن قطر برش معلوم در اندازه های  $\mu m$  تا mm جهت جداسازی ذرات بر اساس قطر آئروودینامیکی استفاده می شود. در این روش فلوی مکش سیستم نمونه بردار  $28/3$  لیتر بر دقیقه انتخاب شد. طبقات هشت گانه کاسکید ایمپکتور دارای مراحل با قطر برش موثر به ترتیب ۱۱، ۷،  $4/7$ ،  $3/3$ ،  $2/1$ ،  $1/1$ ،  $0/7$ ،  $0/4$  به صورت مرحله ای با شماره های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ می باشد. دامنه اندازه ذرات آئروسول جمع آوری شده در هر مرحله وابسته به سرعت جت در آن مرحله و قطر برش مرحله قبل می باشد. مرحله F ایمپکتور شامل یک صفحه برخورد همراه با یک فیلتر پشتیبان می باشد که این فیلتر ذرات کمتر از  $0/4$  میکرومتر را جمع آوری می کند [۵].

به منظور تعیین قطر آئروودینامیکی ذرات در ACI از رابطه ۱ استفاده شد [۱۳].

$$D_a = D_p \sqrt{\rho} \quad (1)$$

$$D_a = \text{قطر آئروودینامیکی } (\mu m)$$

$$D_p = \text{قطر استوکس } (\mu m)$$

$$\rho = \text{دانشیه ذرات } g/cm^3$$

به منظور تعیین دانشیه مخلوط ذرات محیطی، ضمن شناسایی رادیونوکلیدهای محیطی در واکنش های پاره شکافت و نوترونی توسط دستگاه گاما اسپکتروسکوپی، نمونه برداری با استفاده از یک فیلتر ممبران انجام گرفت. فیلتر های ممبران با پور سایز

<sup>2</sup> Andersen Cascade Impactor (ACI)

<sup>1</sup> Impaction

بنابراین می‌توان نوشت:

$$M_t = M_a + M_c \quad (۳)$$

$$M_a = \sum_{i=7}^f m_{ci} \quad (۴)$$

$$M_c = \sum_{i=2}^6 m_{ci} \quad (۵)$$

$m_{ci}$  = غلظت جرمی ذرات در هر مرحله (mg. m-3)

#### آنالیز گراویمتری

بعد از پایان نمونه برداری صفحات جمع آوری کننده به طور دقیق و با احتیاط کامل از ایمپکتور برداشته شده و برای ارزیابی توزیع جرم و اندازه ذرات مورد اندازه گیری دوباره قرار گرفتند. هر یک از صفحات ایمپکتور و فیلتر پشتیبان قبل و بعد از نمونه برداری ۳ مرتبه توزین شده و سپس برای مرحله آنالیز رادیو شیمی آماده شدند.

#### آنالیز رادیو شیمی

از روش اسمیر جهت نمونه برداری از آلاینده‌های تجمع شده در هر طبقه برای اندازه گیری رادیواکتیویته تابع اندازه ذرات استفاده گردید. اسمیر یک صفحه از جنس کاغذ، پارچه و غیره می‌باشد، که جهت نمونه برداری از گرد و غبار سطوح آلوده با ضریب چسبندگی مناسب به صورت خشک یا مرطوب استفاده می‌گردد. صفحات اسمیر که به این ترتیب تهیه می‌شوند جهت شمارش میزان اکتیویته آلاینده‌های پرتوزای هوای داخل محفظه ایمنی راکتور در داخل ویال های پلی اتیلنی مخصوص شمارش سنتیلاسیون مایع قرار می‌گیرد. ویال ها استوانه شکل به ارتفاع برابر ۲۰ mm و فاقد نشتی می‌باشند. جهت شستشوی آلاینده‌ها از سطح صفحه اسمیر ۵ ml محلول ۰/۱ مولار  $HNO_3$  به میزان به داخل ویال اضافه گردید. ویال ها به مدت ۱۰ دقیقه در داخل دستگاه اولتراسونیک قرار داده شد سپس صفحه اسمیر از ویال خارج شده و بعد از این مرحله، ۱۲ ml مایع سنتیلاتور ( $Hisafe3$ ) به داخل ویال اضافه گردید. جهت شمارش ذرات آلفا و بتا کل به طور همزمان از دستگاه سنتیلاسیون مایع<sup>۴</sup> استفاده

چند میکرون به طور گسترده ای جهت جمع آوری ذرات کوچک استفاده می‌شود. مراحل آنالیز شیمیایی - فیزیکی نمونه مطابق روش انجام شد. از دستگاه ICP<sup>۱</sup> جهت تعیین غلظت جرمی رادیو نوکلئیدهای شناسایی شده از گاما اسپکتروسکوپی استفاده شد و مطابق روش ۲ دانسیته مخلوط ذرات تعیین گردید.

$$\rho_{mix} = \sum_{i=1}^n P_i \times \rho_j \quad (۲)$$

در معادله فوق  $P_i$  نسبت غلظت جرمی هر نوکلئید به غلظت جرم کل نوکلئیدها، و  $\rho_j$  دانسیته واقعی ذرات در دمای نمونه برداری است. با دانستن ضریب انبساط گرمایی هر نوکلئید، و از تقسیم اختلاف دمای (Δ) نمونه برداری بر ضریب انبساط گرمایی هر نوکلئید می‌توان دانسیته مخلوط ذرات را در شرایط نمونه برداری محاسبه کرد.

#### ایستگاه نمونه برداری

ایستگاه اندازه گیری در سه نقطه از محفظه ایمنی راکتور تحقیقاتی انتخاب شد. در شکل ۱ طرح کلی از ایستگاه نمونه برداری نمایش داده شده است. سیستم نمونه برداری شامل پمپ و کاسکد ایمپکتور در ارتفاع معینی از سطح زمین نصب، مدت زمان نمونه برداری حدود ۶۰ ساعت و پارامترهای مربوط شرایط سایکرومتری مورد بررسی قرار گرفته است.

#### محاسبات غلظت جرمی آئروسول‌های ریز و درشت

توزیع اندازه ذرات از سه نوع مدل پیروی می‌کند. کوچک‌ترین ذرات با گستره اندازه  $0.1 \mu m$  تا  $0.08 \mu m$  مربوط به مدل آیتکین است. مربوط مدل انبارشی که گستره اندازه ذرات در محدوده  $0.08 \mu m$  تا  $1 \mu m$  قرار دارد. گستره اندازه بین  $1 \mu m$  تا  $40 \mu m$  مربوط به مدل ذرات درشت است. برای راحتی، مدل آیتکین و مدل انبارشی را به صورت مدل ذرات ریز<sup>۲</sup> معرفی می‌کنند. مرز تقسیم بندی<sup>۳</sup> ذرات ریز و درشت  $1 \mu m$  است [۵]

<sup>۱</sup> Ionization Coupling Plasma

<sup>۲</sup> Ultrafine Particle

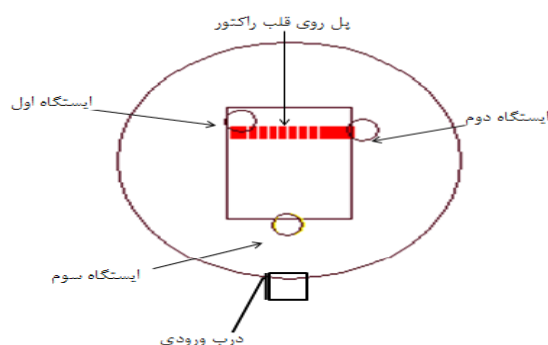
<sup>۳</sup> Division

<sup>۴</sup> Ultra Low Level Liquid Scintillation Spectrometer

غلظت جرمی رادیو نوکلئیدها آنالیز شده جهت تعیین دانسیته مخلوط ذرات استفاده شد. طبق معادله ۲ مقدار دانسیته مخلوط ذرات،  $\frac{g}{cm^3}$  ۱/۹۹۶ بدست آمد.

جدول ۲. دانسیته نوکلئیدهای شناسایی شده توسط اسپکتروسکوپی گاما در دمای نمونه برداری در دمای K ۳۰۳

رادیو ایزوتوپ	دانسیته ذره $\frac{g}{cm^3}$
AC-228	۱۰/۰۶
Bi-212	۹/۷۹
Bi-214	۹/۷۹
Pb-214	۱۱/۳۲
Pb-212	۱۱/۳۲
Tl-208	۱۱/۸۳
k-40	۰/۸۵۹
Mixture	۱/۹۹۶



شکل ۱. نمایی از راکتور تحقیقاتی و ایستگاه های نمونه برداری

ضمن محاسبه دانسیته ذرات، متوسط قطر رئومتر و متوسط قطر آئرو دینامیک ذرات برای این ۹ مرحله در جدول ۳ ارائه شده است.

گردید فرآیند تهیه نمونه و شمارش پرتوزائی فیلتر مورد استفاده در دستگاه ایمپکتور به همان ترتیب صفحه اسمیر انجام شد با این تفاوت که از اسید هیدروفلوریک قوی بجای محلول ۰/۱ مولار  $HNO_3$  جهت شستشوی فیلتر استفاده شد

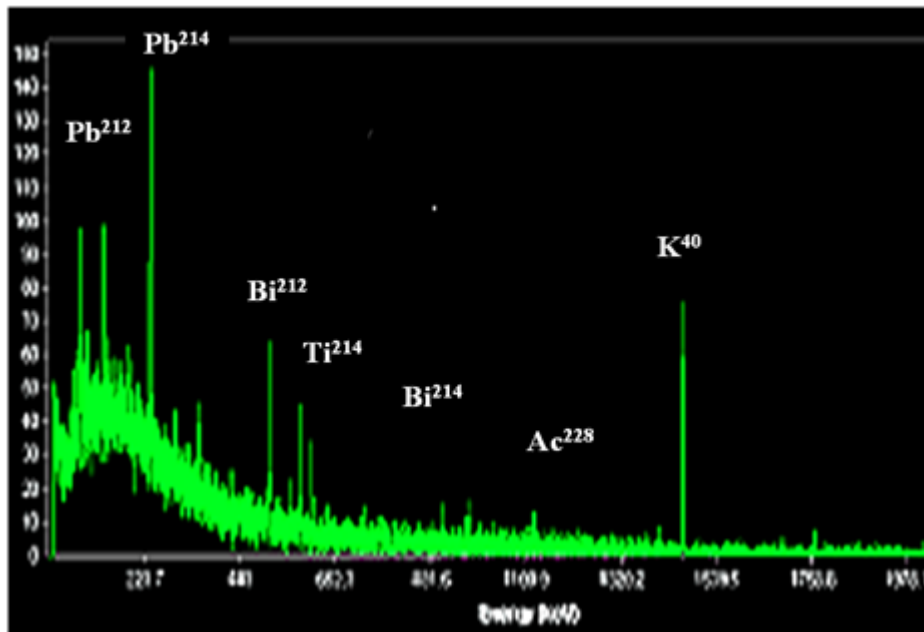
## یافته‌ها

در این تحقیق رادیو نوکلئید های منتشره مختلفی در فعل و انفعالات هسته ای در طول فعالیت راکتور ضمن مطالعه کمی و کیفی شناسایی شد. شکل ۲ ۷ اسپکتروسکوپی از آئروسول های جمع آوری شده بر روی فیلتر ممبران را نشان می دهد. رادیونوکلئیدهای مشاهده شده شامل  $Bi^{212}$ ,  $Bi^{214}$ ,  $Ac^{228}$ ,  $K^{40}$ ,  $Tl^{208}$ ,  $Pb^{214}$ ,  $Pb^{212}$  می باشند. در این میان غلظت هر کدام از رادیو نوکلئید های مشاهده شده، توسط ICP-MS تعیین مقدار شد. جدول ۱ اطلاعات مربوط به غلظت هر نوکلئید را نشان می دهد

جدول ۱. نتایج آنالیز جرمی عناصر تشکیل دهنده با کمک ICP-MS

غلظت در شرایط STP	غلظت در نمونه اولیه	نوکلئید
$(mg.m^{-3})$	$\frac{mg}{L}$	
$۱/۳ \times ۱۰^{-۳}$	۲/۴۵	K
$۲/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۵	Tl
$۲/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۵	pb
$۲/۱۱ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۴	Bi
$۲/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۵	Ac

دانسیته هر یک از نوکلئیدهای شناسایی شده در دمای نمونه برداری در جدول ۲ ارائه شده است. از

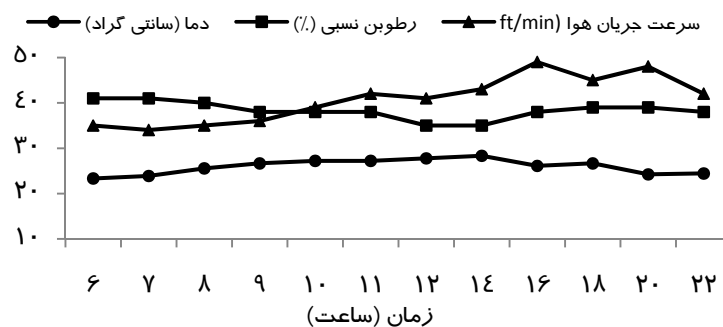


شکل ۲.  $\gamma$  اسپکتروم از آئروسول های جمع آوری شده

جدول ۳. اندازه مراحل و قطر میانگین در ACM

شماره هر مرحله	دامنه اندازه ذرات $\mu m$	قطر برش موثر $\mu m$	متوسط قطر ژئومتری $\mu m$	قطر آئرو دینامیک $\mu m$
۱	$9 <$	۱۱	-	۱۵/۵۴
۲	۵/۸-۹	۷	۸/۷	۹/۸۸
۳	۵/۸-۴/۷	۴/۷	۵/۷۳	۶/۶۴
۴	۳/۳-۴/۷	۳/۳	۳/۳	۴/۶۶
۵	۲/۱-۳/۳	۲/۱	۲/۶۳	۲/۹۶
۶	۱/۱-۲/۱	۱/۱	۱/۵۱	۱/۵۵
۷	۰/۷-۱/۱	۰/۷	۰/۸۷	۰/۹۸
f	۰/۴-۰/۷	۰/۴	۰/۵۲۹	۰/۵۶
filter	۰/۴ >	-	-	۰/۴

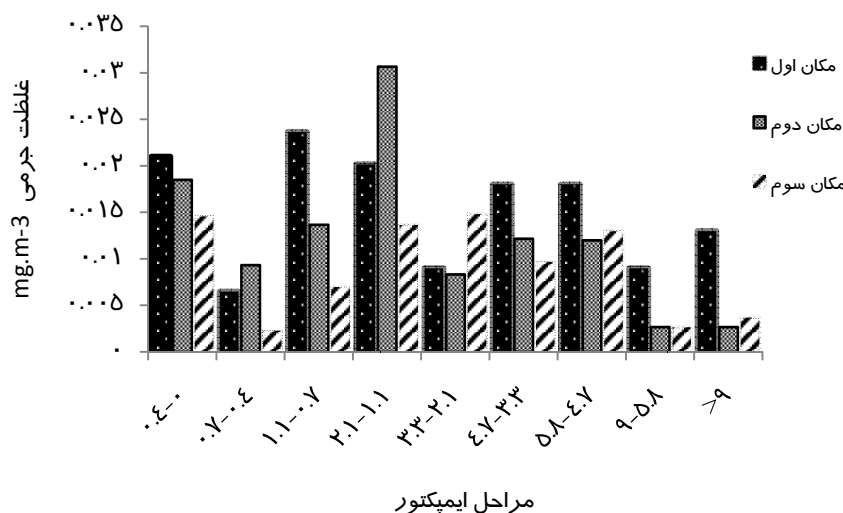
مکانیسم های تشکیل ذرات، پراکندگی، نقل و انتقال و نشست ذرات وابسته به شرایط اتمسفری است [۱۴].  
تغییرات سایکرومتریک در طول ساعات شبانه روز قابل ملاحظه بود. مشخصات فاکتورهای سایکرومتریک مورد بررسی در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. مشخصه های سایکرومتریک (دما، سرعت جریان و رطوبت) در طول دوره نمونه برداری

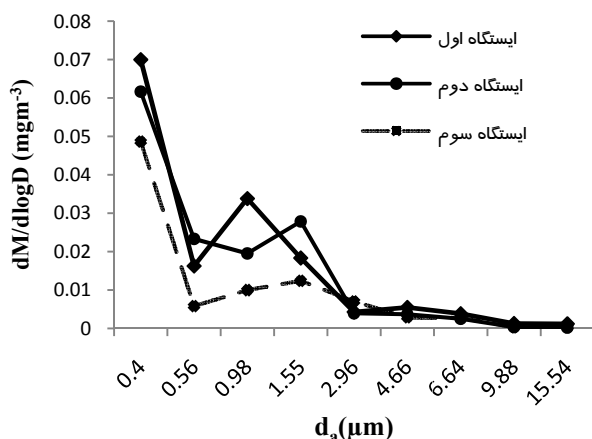
ساعت ۱۳ تا ۱۵ بیشترین مقدار و در ساعات اولیه صبح کمترین میزان را نشان داده است. میانگین جرمی کل ذرات در سه مکان نمونه برداری به ترتیب ۰/۱۳، ۰/۱۱، ۰/۰۸۱  $\frac{mg}{m^3}$  بدست آمد. غلظت جرمی برای مکان اول بیش از دو مکان دیگر نمونه برداری است. شکل ۴ غلظت جرمی ذرات را برای کل آئروسول‌ها بر اساس داده‌های بدست آمده به تفکیک سه مکان مختلف محیطی نشان می‌دهد.

ماکزیمم دمای روز در گستره  $26/6^{\circ}C$  تا  $28/33^{\circ}C$  و معمولاً در ساعت بین ۱۴-۱۳ اندازه گیری شد. حداقل دمای نمونه برداری معمولاً در ساعت ۶ صبح و گستره‌ی دمایی در این زمان  $22/7^{\circ}C$  تا  $23/88^{\circ}C$  بود. تغییرات رطوبت در طول ساعات شبانه روز قابل ملاحظه بود، بطوریکه ماکزیمم رطوبت نسبی ۴۰٪ تا ۴۳٪ در ساعات اولیه صبح که در آن زمان دما در کمترین مقدار بود و کمترین میزان رطوبت ۳۴٪ در ساعات نیم روز مشاهده شد. سرعت باد در بین



شکل ۴- غلظت جرمی آئروسول‌های رادیواکتیو در سه مکان نمونه برداری

اندازه<sup>۱</sup> در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. توزیع جرم ذرات رادیواکتیو در سه ایستگاه کاری در محیط راکتور

مقدار غلظت در هر ایستگاه متغیر است. داده‌های حاصل از اندازه گیری نشان می‌دهد که توزیع جرم - اندازه علاوه بر اینکه تابع ماهیت فرایند تولید در منبع انتشار (راکتور) می‌باشد به فعالیت سایکرومتریک نیز بستگی دارد. تفاوت در ماهیت انتشاری ذرات هوابرد پرتوزا بین سه ایستگاه کاری توسط توزیع جرم

<sup>1</sup> Mass Size Distribution

تعیین مقدار شد. پلاسمای کوپل شده القایی یک روش آنالیز خیلی حساس و فراگیر جهت تعیین غلظت عناصر در گستره مقدار خیلی ناچیز است که توسط محققان مختلف جهت تعیین غلظت عناصر رادیو اکتیو استفاده گردیده است [۱۴]

دانشیته از تبدیل اندازه آثرو دینامیک ذرات به اندازه ژئومتری (استوکس) بدست می‌آید. جرم آثروسل و غلظت حجمی دو پارامتر اساسی در تعیین دانشیته ذرات می‌باشند. در این مطالعه دانشیته مخلوط ذرات  $996 \text{ g/cm}^3$  تعیین شد. بنا بر معادله ۱ قطر آثرو دینامیکی ذرات مطابق جدول ۲ بدست آمد. نتایج هیل<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۸ بر روی دانشیته ذرات نشان داده است که دانشیته ذرات از  $1/8$  تا  $3 \text{ g/cm}^3$  متغیر است [۷]. مورتی<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۱ در مطالعه ای که بر روی توزیع جرم اندازه ذرات در محیط ساحلی انجام داده است دانشیته ذرات را  $2 \text{ g/cm}^3$  گزارش نمود [۱۳]. نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج گزارش شده هم خوانی دارد.

توزیع جرم - اندازه ذرات نشان داد که غلظت جرمی ذرات در مد انبارشی در ایستگاه اول بیش از مقدار بدست آمده در ایستگاه دوم و سوم است. در شکل ۵ می‌توان دید که توزیع غلظت جرمی آثروسل‌های رادیواکتیو در حالت زیر میکرون خیلی بیشتر از غلظت جرمی ذرات درشت است. اساساً به دلیل فراوانی ذرات ریز، شاهد توزیع غلظت جرمی بالای ذرات ریز هستیم. توزیع جرم - سایز مشابهی با این مطالب نیز در بعضی از ایستگاه‌ها در مطالعات قبلی توسط کیم<sup>۴</sup> و همکاران گزارش شده است. در این مطالعه میزان اکتیویته ذرات آلفا و بتا بر حسب موقعیت مکانی به تفکیک ذرات ریز ( $ma < 1 \mu\text{m}$ ) و ذرات درشت ( $mc > 1$ ) در شکل ۶- الف و ۶-ب نشان داده شده است.

با توجه شکل نمایش داده شده، اکثریت جرم آثروسل‌ها در حالت مد انبارشی ( $d_p < 1 \mu\text{m}$ ) قرار دارند. کسر جرمی ذرات ریز در گستره میکرون برای ایستگاه اول ۷۷٪ و برای ایستگاه دوم و سوم به ترتیب ۷۲٪ و ۷۱/۳۴٪ بدست آمد.

در شکل ۶ توزیع اندازه اکتیویته ذرات آلفا و بتا بر حسب قطر آثرو دینامیکی ( $D_p$ ) نشان داده شده است. این توزیع از اندازه گیری از ۳ ایستگاه برای یک دوره ۶۰ ساعت انتخاب شده است. توزیع رادیواکتیویته نشان از توزیع سطح فعال، منتج از تراکم آثروسل‌ها می‌باشد. توزیع اندازه اکتیویته برای آثروسل‌های محیطی به صورت یک توزیع گسترده است. بیش‌ترین میزان اکتیویته برای ذرات با قطر کمتر از  $0.4$  میکرون بدست آمد.

اکتیویته و توزیع جرم اندازه که در شکل ۷ نشان داده شده است مقادیر بدست آمده از آنالیز نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بین میزان اکتیویته و توزیع جرم اندازه ذرات در هر سه ایستگاه کاری ارتباط معنی داری وجود دارد.

## بحث

نتایج اسپکتروسکوپی گاما در این مطالعه نشان داد که در طول فعالیت راکتور، رادیونوکلئیدهای مختلفی (شکل ۲) تولید می‌شود. یکی از روش‌های معتبر به منظور شناسایی محصولات ناشی از شکافت هسته ای اسپکتروسکوپی گاما می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر، انتشار رادیونوکلئیدها همچون  $\text{Ac}^{228}$ ,  $\text{Bi}^{212}$ ,  $\text{Bi}^{214}$ ,  $\text{Pb}^{212}$ ,  $\text{Pb}^{214}$ ,  $\text{Tl}^{208}$  نشان از حضور ذرات رادیواکتیو در محیط کار می‌باشد. که با مطالعه بتی<sup>۱</sup> و همکاران مطابقت دارد [۱].

غلظت جرمی نوکلئیدهای شناسایی شده (در جدول ۱) در محیط راکتور توسط دستگاه ICP-MS

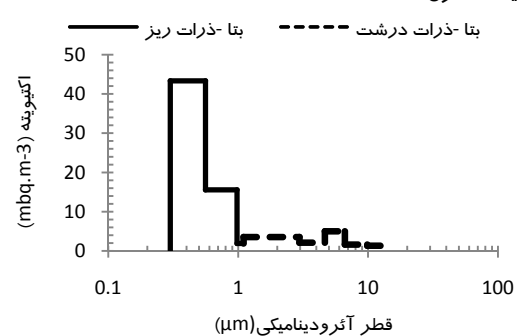
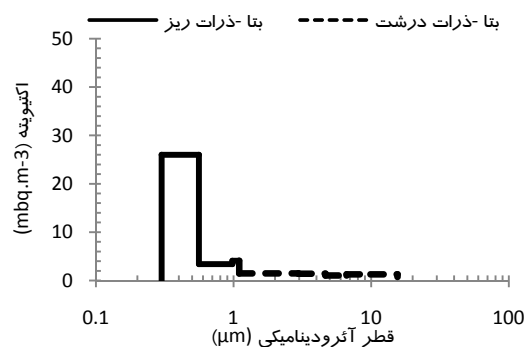
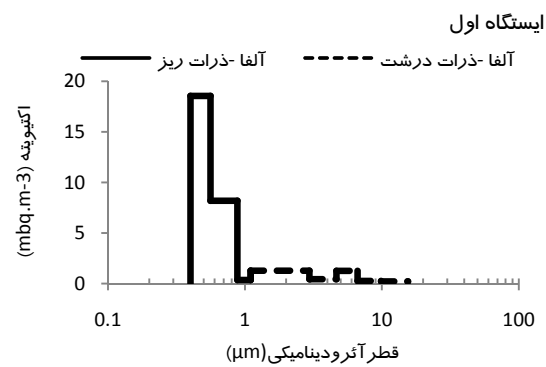
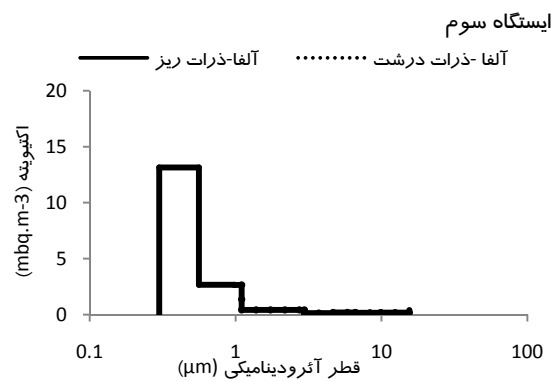
<sup>2</sup> Hanel

<sup>3</sup> Moorty

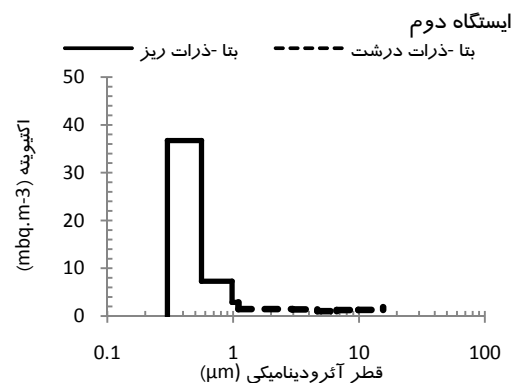
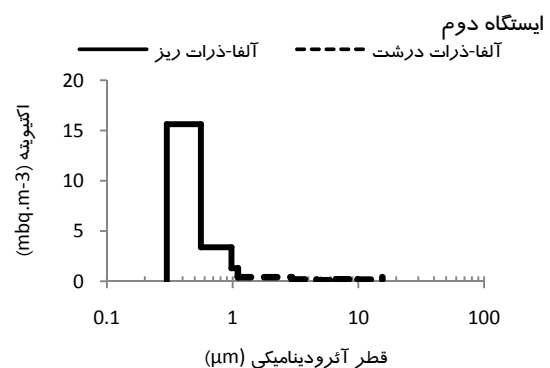
<sup>4</sup> Kim

<sup>1</sup> Betti





شکل ۶. توزیع اندازه-اکتیویته ذرات آلفا و بتا بر حسب قطر آئرو دینامیک به تفکیک ذرات ریز و درشت به ترتیب ایستگاه کاری



در این مطالعه نشان داده شد که برای ذرات با قطر کمتر از یک میکرون میزان اکتیویته آلفا و بتا بالا است. توزیع اندازه اکتیویته ذرات نشان داد که ۸۵-۹۲٪ از اکتیویته ذرات آلفا و ۸۰٪ اکتیویته ذرات بتا در محدوده کسری ذرات زیر میکرون یعنی ذرات ریز قرار دارد. میزان اکتیویته ذرات آلفا ( $\text{mbq.m}^{-3}$ ) برای ذرات ریز ( $m_a < 1 \mu\text{m}$ ) به ترتیب برای ایستگاه اول، دوم و سوم به ترتیب ۸۸٪، ۸۸/۸۶٪ و ۹۲٪ می‌باشد. همچنین میزان اکتیویته ذرات آلفا برای ذرات درشت ( $m_c > 1 \mu\text{m}$ ) به ترتیب ۱۲٪، ۱۱/۳۶٪ و ۰/۰۷۶٪ بدست آمده است. در شکل ۶-ب میزان اکتیویته ذرات بتا در طول دوره نمونه برداری نشان داده شده است. میزان اکتیویته ذرات بتا برای ذرات ریز ( $m_a < 1 \mu\text{m}$ ) به ترتیب برای ایستگاه اول، دوم و سوم ۴۳/۸۰٪، ۸۴/۹۳٪، ۸۲/۲۶٪ و میزان

نوع اندرسون انجام شد بیشترین اکتیویته به ترتیب مربوط به ذراتی با قطر کمتر از  $1 \mu\text{m}$ ،  $0.1 \mu\text{m}$  و  $0.18 \mu\text{m}$  و  $0.36 \mu\text{m}$  بدست آمد. همچنین در این مطالعه نشان داده شد که کمترین میزان اکتیویته مربوط به ذرات درشت می‌باشد [۱۷]. ویوور<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۹ گزارش داد که بیش از ۷۴٪ اکتیویته مربوط به ذراتی با قطر کمتر از  $1 \mu\text{m}$  بدست آمد. به طوری که بیشترین اکتیویته مربوط به ذراتی با گستره  $0.1 \mu\text{m}$  تا ۱ بود در حالی که ذرات درشت تقریباً حدود ۲٪ را شامل بودند [۱۸]

### نتیجه گیری

انتشار رادیو نوکلیدهای از قبیل  $\text{Bi}$ ,  $\text{Bi } 212$ ,  $\text{Ac}^{228}$ ,  $\text{Pb}^{212}$ ,  $\text{Tl}^{208}$ ,  $\text{K}^{40}$  در طول فعالیت راکتور نشان‌دهنده حضور ذرات رادیو اکتیو در محیط است. غلظت جرمی ذرات برای سه مکان مختلف به ترتیب  $0.13$ ،  $0.11$  و  $0.081 \text{ mg. m}^{-3}$  بدست آمد. توزیع جرم اندازه ذرات ریز نسبت به ذرات درشت در هر سه ایستگاه کاری دارای ماکزیمم مقدار بود. بیشترین اکتیویته مربوط به ذرات ریز و با گستره اندازه کمتر از ۴۰۰ نانومتر بدست آمد نتایج نشان داد که بیش از ۸۰٪ اکتیویته (آلفا و بتا) جذب ذرات در گستره اندازه زیر میکرون ( $ma < 1 \mu\text{m}$ ) و تنها کمتر از ۲۰٪ بر روی ذرات درشت ( $mc > 1 \mu\text{m}$ ) متصل می‌شوند. این نتیجه حاکی از آن است که در محیط، غلظت ذرات ریز نسبت به ذرات درشت از فراوانی بیشتری برخوردار است، که این موضوع باعث شده که توزیع جرم اندازه و همچنین اکتیویته ذرات ریز بیش از ذرات درشت باشد. تغییر در دما، رطوبت نسبی و سرعت جریان باد منجر به تغییراتی در اندازه، ساختار ذرات تولیدی می‌شود.

اکتیویته ذرات درشت به ترتیب  $19/57$ ٪،  $15/06$  و  $17/73$ ٪ بدست آمد. به طوری که می‌توان گفت بیش از ۸۰٪ اکتیویته آلفا و بتا در هر سه ایستگاه کاری جذب ذرات آئروسل در گستره اندازه مد انبارشی و تنها کمتر از ۲۰٪ اکتیویته آلفا و بتا بر روی ذرات با قطر بیش از میکرون ( $mc > 1 \mu\text{m}$ ) متصل می‌شوند. تغییر ما از اکتیویته بالای ذرات در گستره کمتر از  $0.4$  میکرون نسبت به سایر اندازه ذرات به دلیل بالا بودن تعداد ذرات در گستره کمتر از  $0.4$  میکرون در محیط اتمسفری است. بطوری که می‌توان گفت، ضریب احتمال برخورد یونها با ذرات اتمسفری متناسب با تعداد ذرات است [۱۵]، بطوری که با کاهش سایز ذرات شاهد افزایش تعداد ذرات در اتمسفر هستیم. دلیل مهم دیگر افزایش سطح ویژه برهمکنش ذرات زیر  $0.4$  میکرون نسبت به ذرات بزرگتر است. افزایش قابل ملاحظه سطح نسبت به جرم، فاکتور مهم در برخورد و اتصال یونها به ذرات اتمسفری است [۵]. به دلیل سایز کوچک، این ذرات سطح وسیعی دارند که آمادگی برای جذب سطحی یا واکنش را داشته و باعث افزایش فعالیت شیمیایی این ذرات می‌گردد. بطوری که می‌توان گفت برای یک جرم ثابت با کاهش سایز ذره، سطح ویژه ذرات افزایش پیدا می‌کند. پورستندورفر<sup>۲</sup> در مطالعه ای که بر روی توزیع اندازه آئروسل در محیط بیرون بر روی دختران رادون انجام داد نشان داد که بیشترین اکتیویته محصولات واپاشی رادون در گستره ذرات انبارشی قرار دارد [۱۶]. آیونیدوا<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۰ گزارش کرد که بیش از ۸۰٪ اکتیویته  $\text{Be}^7$  مربوط به ذراتی است که قطر کمتر از  $1/3 \mu\text{m}$  دارند [۳]. گرابوسکی<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۹ مطالعه ای بر روی رادیو نوکلید  $\text{Pb}^{210}$  و  $\text{Po}^{210}$  انجام داد، در این مطالعه که توسط کاسکید ایمپکتور ۸ مرحله ای از

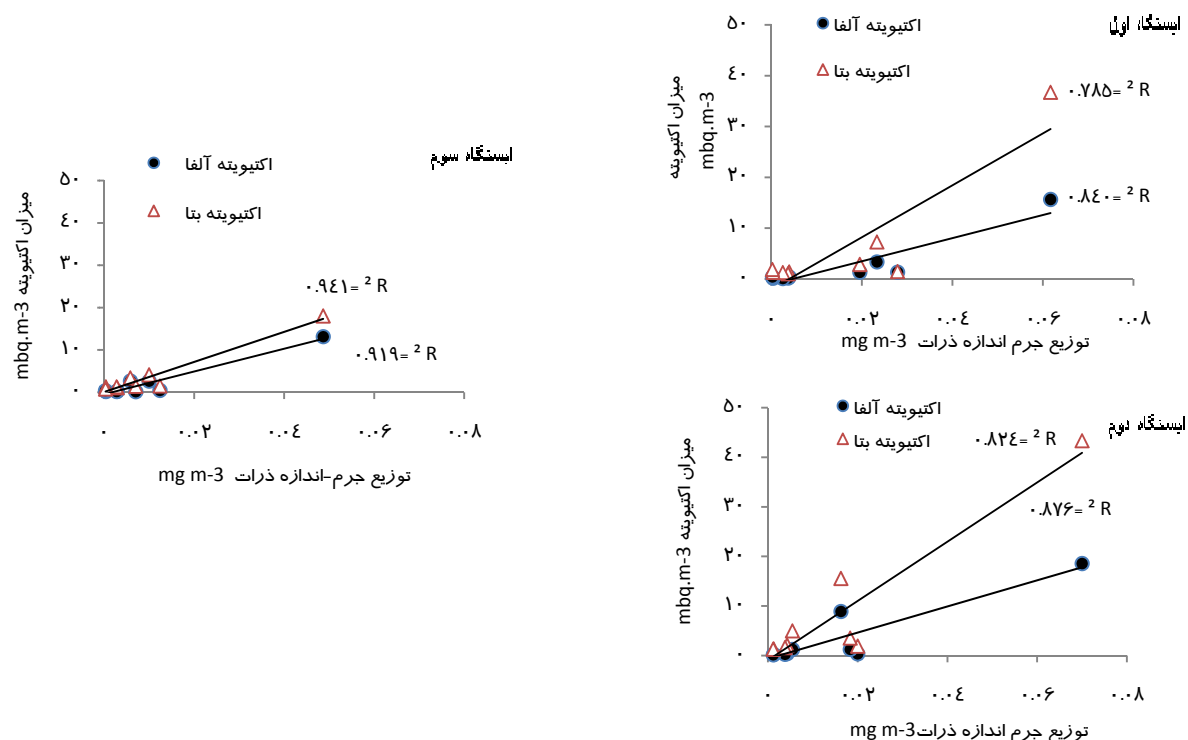
<sup>1</sup> Surface Aera

<sup>2</sup> Porstendorfer

<sup>3</sup> Ioannidoa

<sup>4</sup> Grabowski

<sup>5</sup> Weaver



شکل ۷. ارتباط بین توزیع جرم اندازه با میزان اکتیویته در هر ایستگاه

## References

- 1- Betti M. Environmental monitoring of radioisotopes by mass spectrometry and radiochemical methods in urban areas. Microchemical journal. 2000;67(3-1):363-73.
- 2- Sadigzadeh SMH, Assadi MR. Theoretical and experimental evaluation of aerosol capture mechanisms and the determination of the quality of fibers filters as used in nuclear industry. Scientific Bulletin of the atomic energy organization of iran. 2003;44-22:38
- 3- Ioannidou A. Activity size distribution of  $^{70}\text{Be}$  in association with trace metals in the urban area of the city of Thessaloniki, Greece. Atmospheric Environment. 2011;45(6):90-1286
- 4- Mohamed A. Activity size distributions of some naturally occurring radionuclides  $^7\text{Be}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{212}\text{Pb}$  in indoor and outdoor environments. Applied Radiation and Isotopes. 2005; 62(5): 751-757
- 5- Papastefanou C. Radioactive aerosols. Radioactivity in the Environment. 2008; 58-12:11
- 6- Gründel M, Porstendörfer J. Differences between the activity size distributions of the different natural radionuclide aerosols in outdoor air. Atmospheric Environment. 2004;38(22):8-3723
- 7- Raghavendra KK, Narasimhulu K, Balakrishnaiah G, Suresh KRB, Rama GK, Reddy R, et al. Size segregated mass concentration and size distribution of near surface aerosols over a tropical Indian semi-arid station, Anantapur: Impact of long range transport. Science of the Total Environment. 2009;407(21):604-5586.
- 8- Frey AK, Tissari J, Saarnio KM, Timonen HJ, Tolonen-Kivimäki O, Aurela MA, et al. Chemical composition and mass size distribution of fine particulate matter emitted by a small masonry heater. Boreal environment research. 2009;14(2):71-255.
- 9- Yaraahmadi R, Moradi GR, Sadigzadeh A, Rezaei fard B, Bakand S, Farshad AA. Qualitative and quantitative characteristics of airborne radioactive particles in the Tehran Research Reactor. Air Flow and Pollution national conference. 2012.

- 10- Reineking A, Becker K, Porstendörfer J. Measurements of the unattached fractions of radon daughters in houses. *Science of the Total Environment*. 1985; 45:261-270.
- 11- Standardization IOF. General principles for sampling airborne radioactive materials: International Organization for Standardization. 1975: 25.
- 12- Demokritou P, Lee SJ, Ferguson ST, Koutrakis P. A compact multistage (cascade) impactor for the characterization of atmospheric aerosols. *Journal of aerosol science*. 2004; 35(3): 99-281.
- 13- Pillai PS, Moorthy KK. Aerosol mass-size distributions at a tropical coastal environment: response to mesoscale and synoptic processes. *Atmospheric Environment*. 2001; 35(24): 4099-112.
- 14- Lariviere D, Taylor VF, Evans RD, Cornett RJ. Radionuclide determination in environmental samples by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2006; 61(8): 904-887
- 15- Winder C, Stacey NH. Occupational toxicology. 2 nd Edition. CRC Press. Stacey, Southern Cross Pharma, Springwood, Australia. 2004.
- 16- Porstendörfer J, Zock C, Reineking A. Aerosol size distribution of the radon progeny in outdoor air. *Journal of environmental radioactivity*. 2000; 51(1): 48-37
- 17- Długosz M, Grabowski P, Bem H. 210-Pb and 210-Po radionuclides in the urban air of Lodz, Poland. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 2010; 283(3): 25-719.
- 18- Weaver J, Biegalski SRF, Brand A, Artnak E. Design of aerosol sampler to remove radon and thoron progeny interference from aerosol samples for nuclear explosion monitoring. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 2008; 282(3): 92-687.

## Role of Radioactive Emitting Particle Size on Dispersion of $\beta$ and $\alpha$ Emitting Particles in Tehran Research Reactor Safety Enclosure

Moradi GH<sup>1</sup>, Yarahmadi R<sup>2</sup>, Poureshgh Y<sup>3</sup>, Farshad A<sup>4</sup>, Sedigzadeh A\*<sup>5</sup>, Parastar S<sup>3</sup>, Hajizadeh R<sup>6</sup>

1- MSc in Occupational health, School of public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

2- Assistant professor, Research Center for Occupational Health, School of public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3- MSc in Environmental Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

4- Associate prof of Occupational Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

5- Associate prof, Physics Research Department, Nuclear Science and Technology Institute, Tehran, Iran.

6- MSc Student of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

\* Corresponding author. Tel: +982182064326 Fax: +982182063095 E-mail: asadigzadeh@yahoo.com

Received: 10 Sep 2012 Accepted: 7 Nov 2012

### ABSTRACT

**Background & Objectives:** In the nuclear industry, aerosols play an important role on emission and dispersion of pollutants. Nuclear reactors are the principal sources for pollution in fuel cycle and emit different radioisotopes into the environment. The radioactivity and size distribution of aerosols were measured using Anderson cascade Impactor (ACI) at three workstations in Tehran Research Reactor safety enclosure.

**Methods:** Mass concentration and distribution of airborne particles in the chamber environment were determined using ACI. In order to identify radionuclides present in airborne particles of chamber fiber filters were used. Element identification and mass concentrations were performed using ICP-MS. To identify radionuclide type and determine their radioactivity in suspended particles,  $\gamma$ -ray spectrometry and liquid Scintillation spectrometer were used, respectively.

**Results:**  $\text{Pb}^{212}$ ,  $\text{Pb}^{214}$ ,  $\text{Be}^{212}$ ,  $\text{Be}^{214}$ ,  $\text{Ti}^{208}$ ,  $\text{Ac}^{228}$  and  $\text{K}^{40}$  radionuclides were determined by gamma spectrometry. Maximum mass was related to fine particle of 0 to 0.4  $\mu\text{m}$ . The greatest portion of alpha and beta particle were adsorbed on aerosols with the aerodynamic diameter of less than 0.4  $\mu\text{m}$ .

**Conclusion:** Majority of radioactivity was related to the particles in storage and nucleation areas (fine particles). The origin of these particles may be coagulation of mode particles "nucleation" and concentration growth in the particle size of studied.

**Keywords:** Aerosol; Mass Distribution of Size; Radioactivity; Liquid Scintillation; Tehran Reactor; Anderson Impactor